

潮汐作用对莱州湾南岸冬季 地下水位的影响研究

苏 乔^{1,2,3}, 徐兴永^{1,2,3}, 陈广泉^{1,2,3}, 付腾飞^{1,2,3}, 刘文全^{1,2,3}

(1.海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;

2.国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3.青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要:潮汐波动具有稳定的周期性,当地下水受其影响时,这种周期性在地下水位变化中必会有所反映,但同时也会受到人为开采地下水、降雨等因素的影响而很难被识别出来。通过谱分析认为莱州湾南岸地下水位同潮位共同存在 12 和 24 h 两个主要周期,采用傅立叶变化与去趋势分析结合的方法提取出了地下水位中受潮汐影响的频率成分,并利用自相关分析的方法对处理后的地下水位数据与潮位数据进行了对比分析。结果显示,虽然莱州湾南岸地下水受人为开采地下水影响显著,但通过去除长期趋势和提取频率的方法可以有效提取冬季地下水位中受潮汐作用影响的因素,从而为其他研究提供了一种有效的原始数据处理方法。

关键词:海水入侵;潮汐波动;地下水位;交叉谱;自相关

中图分类号:P736

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2017)04-0568-11

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2017.04.013

在世界范围内,海水入侵已经成为海岸带地区主要自然灾害之一,迄今为止,全世界已有几十个国家 and 地区发现了海水入侵问题,如美国、澳大利亚、黎巴嫩、以色列、日本和埃及等^[1]。海水入侵的研究开始于 19 世纪末,但是早期大多数研究成果都是在假定海平面静止,即不考虑潮汐波动影响的基础上得出的^[2-6]。

实际上,潮汐波动是海岸带水文地质学的一个基本组成部分,同时也是海岸带含水层中地下水流动的一个重要驱动力^[7-8]。由于潮汐波动具有稳定的周期性,因此其对近岸地下水的影响是可以预测的,许多学者在数值模拟中也逐渐开始考虑潮汐作用的影响,Acworth 等^[9]与 Morrow 等^[10]研究认为咸淡水界面受潮汐作用移动范围较小,但对咸淡水混合区的结构和厚度影响显著。海滩的地貌和地层特征也是影响潮汐对滨海地下水作用的重要因素^[11-13]。但这些研究往往设置严格的限制条件,或对潮汐波动和地层条件进行简化处理。

时间序列分析能有效地分析水文进程的时间变化模式和含水层系统的脉冲响应特征^[14]。Lanyon 等^[15]用来分析了澳大利亚卧龙岗南沙滩剖面处潜水位随海潮水位的变化过程。Kim 等^[16]分析了滨海地区地下水水位、电导率等随海潮潮水位的变化特征,得出了滨海地区地下水水质主要受潮汐控制的结论。Kim 等^[17]在韩国济州岛东部根据时间序列分析,认为潮汐对地下水位的影响可达到距离海岸线 3 km 的内陆。Park 等^[18]利用时间序列分析方法、并结合水位与电导率数据,强调了持续开采地下水会加剧朝鲜半岛西部沿海破碎基岩含水层的海水入侵。在中国,也有多位学者在不同地区进行了潮汐对地下水的影响研究,如周训等通过谱分析认为滨海含水层地下水位滞后于海潮的时间,并随海岸距离的增加近似呈线性增加^[19];阮

收稿日期:2016-09-19

资助项目:国家自然科学基金项目——滨海地区地下水对潮汐作用的响应机制研究(41406072);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——滨海地区地下水对潮汐作用的响应机制研究(2015P10)

作者简介:苏 乔(1983-),男,山东日照人,助理研究员,博士,主要从事海洋地质和第四纪环境等方面研究. E-mail:suqiao@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

传侠等对北海地区海潮引起的滨海含水层地下水位变化动态特征进行了研究,认为地下水位波动幅度小于海潮,并且随距海岸距离的增加呈负指数衰减^[20];付丛生等采用互相关分析、谱分析、Mallat 分解重构等方法分析了潮汐对地下水位波动振幅的影响,认为微承压水水位相对海潮延迟时间为 7.0 h,波动振幅为海潮的 1/100^[21];高茂生等对潮汐作用下的滨海湿地浅层地下水动态变化进行了研究,认为受潮汐影响,海岸带湿地浅层地下水具有复杂的周期性和趋势性变化^[22]。虽然这些研究通过时间序列分析取得了一系列成果,但是他们大多对自然状态下潮汐与地下水位的关系进行了分析,对于人为干扰较为强烈的情况下的案例并没有做更进一步研究。本论文选取了一个受人为活动影响强烈的滨海含水层案例,对地下水位与潮汐之间的关系进行了分析。

1 研究区概况

莱州湾位于中国山东省沿海的西北部,冬季受寒潮影响较大,气候寒冷,夏季比较炎热,大陆性气候特征显著。莱州湾海区波浪主要受季风控制,全海区的波浪以风浪为主,出现频率在 80% 以上。莱州湾海区的潮汐为不正规混合半日潮,涨潮流向西南,退潮流向东北,潮汐日不等为高潮不等。

莱州湾南岸地区具有丰富的地下卤水资源,虽然对于当地地下卤水的成因还存在争议,但研究人员一致认为海水为其主要矿物质来源^[23]。晚更新世以来本地区长期处于沉降活动过程中,张祖陆等对晚更新世和全新世海相、陆相地层进行了系统研究,认为该地区存在 3 次大规模海侵,并确定了入侵的范围,3 次海侵海退过程对应形成了多层地下卤水^[24]。研究区内地下卤水主要赋存于第四系海相地层的松散沉积物中,含水层岩性主要由粉砂、细砂、泥质粉细砂组成,地下卤水分布面积约 1 500 km²,矿化度为 50~150 g/L,最高达到 217 g/L。卤水层自上而下分为潜水卤水层组、上承压卤水层组和下承压卤水层组,埋藏深度分别为 0~20 m, 30~45 m 和 40~60 m,部分地段还存在一个薄层承压卤水层,深度在 60 m 以下^[24]。其中,潜水卤水层赋存于全新世海相层的砂质粉砂层中,且与海水相通连,矿化度相对较低。由于地下卤水浓度远超海水浓度,因此当地大量开采地下卤水进行盐化工生产和原盐生产,目前开采层主要集中于上承压卤水层,由于该层卤水资源逐渐枯竭,部分新井已开采至下承压卤水层。盐业生产受气温影响非常显著,冬季为生产的低潮期,因此在研究时间段内地下卤水的开采量基本处于全年的最低值。

为保证获取潮汐作用对滨海地区地下水影响的更为准确的资料,尽可能的排除人为干扰,我们选择将研究剖面设置在莱州湾南岸的昌邑市海洋生态特别保护区(图 1)。昌邑海洋生态特别保护区位于山东省潍坊市北部,主要由堤河以东、海岸线以下的滩涂组成,区内保持了较为完整的海岸带原始风貌,并且人为作用对地下水的干扰相对稳定。

2 材料与方法

在莱州湾南岸利用 Cera-Diver 探头共采集 6 口观测井的地下水位数据(图 1),其中 W1 井位于平均高潮线上,W2~W6 距 W1 直线距离分别为 335, 1 015, 1 550, 2 010 和 2 370 m,各观测井深度在 12~13 m,均在潜水层。在研究区东南分布有大量盐田,W6 井距离盐田最近,仅有约 1.5~1.8 km。2013-12-14T 17:00—2014-01-31T 23:00,对 W1~W6 井地下水位进行连续观测 1 159 h,每小时获取次地下水位;相应的潮位数据来源于潍坊市海洋环境监测站潍坊港潮位站,该潮位站位于观测井西北方向约 20 km,为距离观测井周围最近的潮位站,潮位的观测时间同地下水位测量时间一致。在观测时间段内,研究区没有有效降雨。

潮汐波动是有规律的周期性波动,莱州湾海区的潮汐为不正规混合半日潮,在频谱上应该有两个主要频率成分,当地下水受潮汐波动的影响,则在这两个频率上将有所反映。谱分析就是一个序列分解成一系列代表固定长度周期的频率,交叉谱分析则是分析两个时间序列之间频率相关性程度的谱分析方法。利用软件 Arand for Windows 计算潮位与地下水位之间的交叉谱函数来证明地下水同潮汐波动之间的频率相关性。

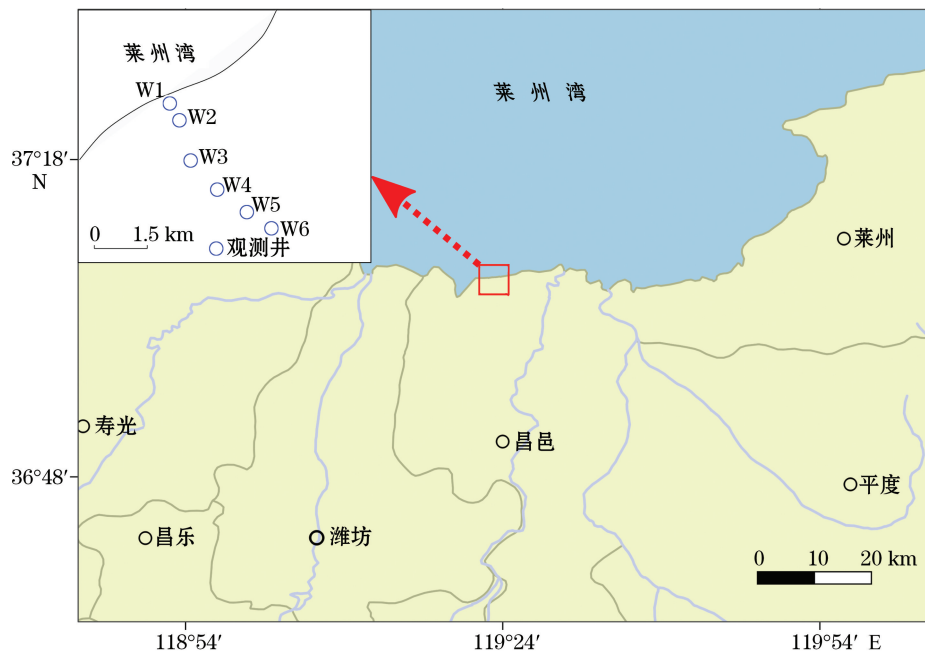


图1 研究区域与观测井分布

Fig.1 Study area and locations of monitoring wells

研究区地下水位受当地开采地下卤水影响显著,由于地下卤水开采的季节性变化,在地下水位上反映出较强的线性趋势,这种由于人为干扰形成的线性趋势的存在严重干扰我们对地下水位和潮汐波动之间关系的分析,因此有必要在数据分析前消除掉这种干扰因素。软件 Matlab 集成了众多可用于数学计算及信号处理的函数,我们直接采用 Matlab 中 Detrend 函数来去除地下水位中的线性趋势。

潮汐波动是有规律的周期性数据,在自然状态下,滨海地区一定范围内的地下水位也应存在这种规律,对此 Kim 等^[16]等通过时间序列分析已经验证。但是在人为干扰情况下,这种周期性规律受到干扰,因此需要将地下水位中受潮汐影响的因素提取出来。我们采用傅立叶变换的方法将地下水位的时间序列数据转化为频率谱,并从中提取出地下水位中同潮汐波动一致的频率信息,然后再通过傅立叶逆变换转换为时间序列数据。地下水位频率的提取与变换通过 Matlab 编程实现。

自相关分析可以部分地反映一个随机过程的性质,表达在一个序列中邻近数据之间存在的相关性。如果这个时间序列是不相关的,自相关函数将会快速减少,并且在一个较短时间滞后后达到零值,如果这个时间序列具有很强的相关性和长记忆效应,时间序列函数将是一个缓慢降低的斜率,并且在一个长滞后时间后仍是一个非零值^[25]。本文通过自相关分析来验证地下水位周期性提取的有效性。由 Kim 等^[17]和 Tularam 和 Keeler^[26]可知自相关函数的公式:

$$C(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}); \quad (1)$$

$$r(k) = \frac{C(k)}{C(0)}. \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 地下水位和潮位的时间变化

在频率分析中,当平均值分量幅度很大而想重点分析的频段幅值又较小时,为了提高对有用信号分析的准确度,就需要预先减去信号平均值。由于潮汐对地下水位影响比较微弱,因此在分析前,我们首先对各监测井地下水进行减掉平均值处理,利用分别减掉平均值的地下水位值作为各观测井的相对水位,同时利用潮位观测数据减掉平均值作为相对潮位数据,将处理后的相对水位和相对潮位作为本论文分析的基础数据(为方便描述,以下将“相对”二字省略)。

研究区海域潮位随时间变化曲线见图 2,潮位随时间变化结果显示该地潮汐为显著的不规则半日潮,潮汐日不等主要表现为高潮不等,即每隔约 12 h 存在一个潮汐周期,而相邻两个潮汐周期的潮位振幅并不相等,即存在一个相对高潮期,一个相对低潮期;相隔潮位周期的振幅基本相等,说明除存在一个约 12 h 周期外,还有一个约 24 h 的周期。在观测时间范围内,潮位波动较为规律,振幅没有发生剧烈变化,最大潮差为 319 cm。

从各监测井地下水位随时间变化特征(图 2)可知,W1~W3 井的地下水位在观测期内整体趋势基本一致,即地下水位具有波动性上升的趋势,并且 W1~W3 井地下水位的波动范围比较接近,观测期内 W1~W3 井最大水位差分别为 115.7,77.7 和 92.7 cm。同 W1~W3 井水位变化不同的是,W4~W6 井地下水位在观测期内整体上升趋势不明显,甚至有小幅下降的趋势,水位变化范围也较小,W4~W6 井观测期内最大水位差分别为 44.8,31.8 和 26.1cm。W4~W6 井最大水位差不到 W1~W3 井的 1/2。

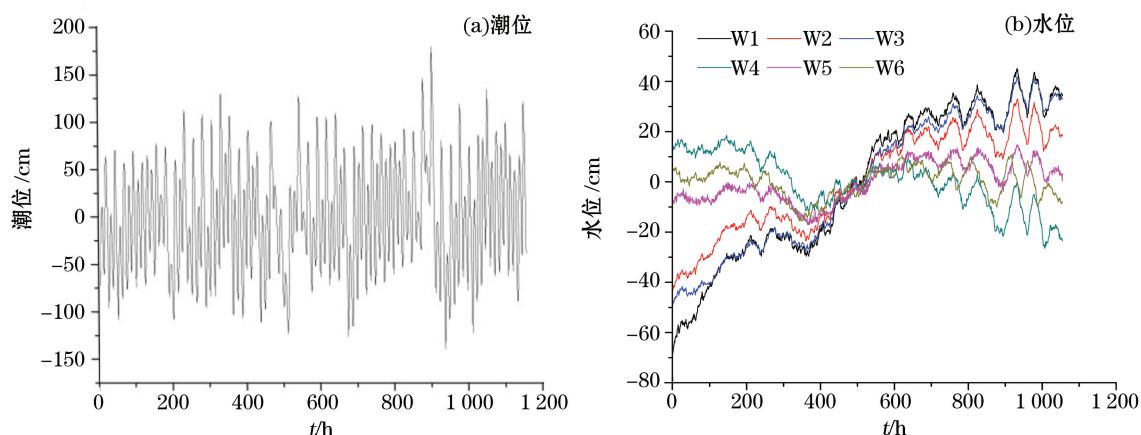


图 2 监测井水位和潮位数据随时间变化曲线

Fig.2 The Variations of the tide level and groundwater level with time in monitoring wells

从总体上看,W1~W6 井地下水位的变化趋势有所差异,但共同特点是在观测 300 h 开始逐渐下降,到 400 h 时均出现相对低值,400~700 h 是地下水位快速上升期,700 h 后水位变化又出现较大差异。我们知道,盐业生产受气候和气温的影响非常显著,冬季为莱州湾南岸地区盐业生产的低潮期,因此在研究时间段内当地地下卤水的开采量基本处于全年的最低值,与此同时海平面则保持基本平稳的状态,也没有风暴潮等异常现象的干扰,地下卤水开采量的减少导致地下水位逐渐回升。开始观测至 300 h,以及 400~700 h 观测范围内的水位的上升主要反映了卤水开采量的减少导致的潜水位回升,而 300~400 h 地下水位的下降以及 700 h 以后的水位较大波动,我们认为应与当地地下卤水开采量变化有关,在当地卤水开采量可能存在某种原因的突然增加过程。

3.2 交叉谱分析

图3分别展示了W1~W6井水位同潮位数据之间的交叉谱分析结果,从潮位数据的谱密度分析结果来看,潮位数据存在两个主要的波峰,频率分别大约为0.083和0.042,分别对应约12和24 h的周期,同图2潮位数据振幅谱图中显示的周期相一致。

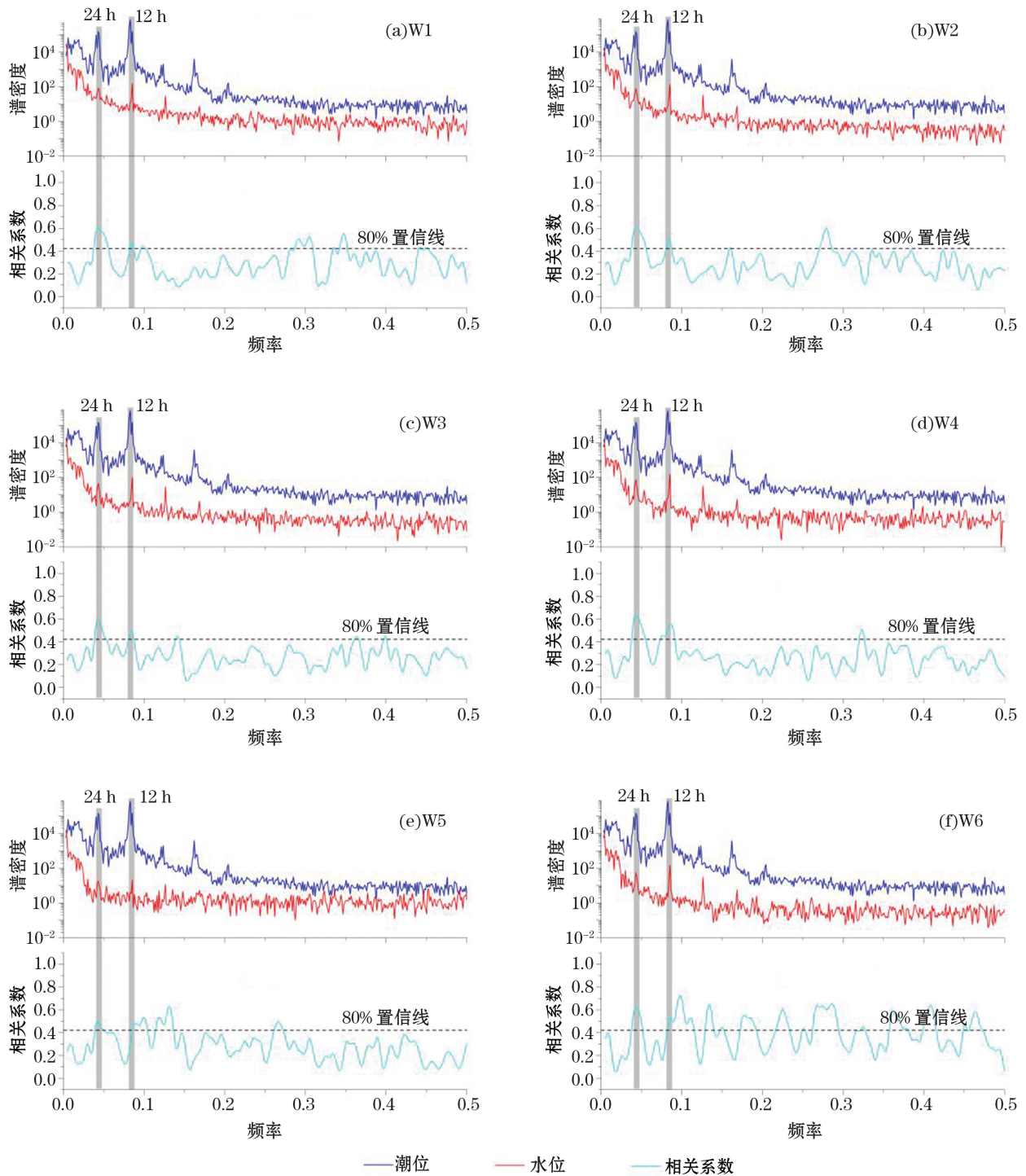


图3 W1~W6井水位与潮位的谱密度与交叉谱分析结果图

Fig.3 The cross spectral analysis of water level and tidal level in monitoring wells

W1~W6 地下水位的谱密度分析结果显示,在频率为大约 0.083 和 0.042 时也存在较为明显的波峰,同潮位谱密度相同,同时也与图 2 中各监测井地下水位频率振幅图具有相同规律。同潮位谱密度的区别在于地下水位在小于 0.042 频率上也存在较大的谱密度,我们认为这主要与人为因素的干扰有关,人为因素的干扰造成了长期趋势的存在,在低频率谱上显示高密度特征。

从交叉谱分析结果(图 3)还可以看出,在约 0.042 和 0.083 频率上,即约 24 和 12 h 周期,W1~W6 井地下水位同潮位数据的交叉谱分析均通过了 80%置信度检验,说明 W1~W6 均受到潮汐 12 和 24 h 周期的显著影响。同 0.042 的频率相比,0.083 频率上相关系数检验值普遍偏低,说明在 12 h 的周期上,W1~W6 井地下水位受潮汐影响不如 24 h 周期明显。

3.3 数据处理与自相关分析

潮位资料自相关分析结果见图 4,分析结果进一步加强了我们对 12 和 24 h 潮汐周期的认识,潮位数据相邻两个正峰值或负峰值相差大约 12,但相邻峰值并不相等,而与相隔一个峰值数据基本一致,负峰值与正峰值具有相似特征。随滞后时间增加,自相关系数具有波动性逐渐减小的总体趋势,这与 Kim^[17] 和 Tularam 等^[26] 研究相一致。

从图 4 可以看出,W1 井地下水位自相关曲线没有明显趋势,周期性也不明显,从图 2 我们知道 W1 井水位具有显著的长期趋势,长期趋势的存在使其受潮汐作用的周期性不明显。因此我们首先需要对 W1 曲线进行去长期趋势处理,处理后的水位和自相关曲线见图 4c 和 4d,显然,去掉长期趋势后,水位曲线上上升趋势消失,但自相关曲线变化并不明显。

从交叉谱分析结果可知,W1 井水位具有同潮位数据具有相同的 12 和 24 h 周期,即频率约 0.042 和 0.083,我们认为 0.035~0.085 的频率基本能覆盖水位中受潮汐波动影响的频率成分,采用傅里叶变换和逆变换的方法从 W1 井水位中提取 0.035~0.085 频率,变换后的原始曲线和自相关曲线见图 4e 和图 4f,变换后的水位曲线周期明显,但序列两端水位出现异常,说明受长期趋势的影响显著,自相关系数也呈明显周期性,但随滞后时间衰减迅速,并且峰值没有明显规律。

单纯去长期趋势和滤波都不能有效提取出水位中受潮汐影响的因素,因此我们考虑结合以上两种方法,采用先去除长期趋势,后提取 0.035~0.085 频率的方法,对 W1 水位数据进行处理,处理后水位曲线和自相关曲线见图 4g 和图 4h,处理后的水位数据同潮位数据曲线基本相似,自相关曲线也基本一致,说明我们这种处理方法基本消除了人为因素的干扰,有效地提取了 W1 地下水位中潮汐作用的影响因素。图 4h 中自相关曲线随滞后时间减弱的趋势比潮位自相关曲线更强,说明随时间的推移,潮汐作用对 W1 地下水位的影响逐渐自然减弱。此外,地下水位自相关系数沿水平轴并不是均匀波动,相邻两个峰值相比正值一般要大于负值绝对值,说明在高潮时潮汐对地下水位的影响要比低潮时更强。

从图 3 我们知道 W2~W6 的谱分析和交叉谱分析同 W1 基本一致,为方便比较,我们也对 W2~W6 井地下水位数据进行去除长期趋势和提取 0.035~0.085 频率处理,结果见图 5。处理后,W1~W6 水位随时间波动明显,均存在 12 和 24 h 的周期,同潮位数据峰值规律一致。此外沿海岸带向陆地方向(W1~W6),地下水位振幅逐渐减小,说明潮汐作用对地下水位的影响逐渐减小。

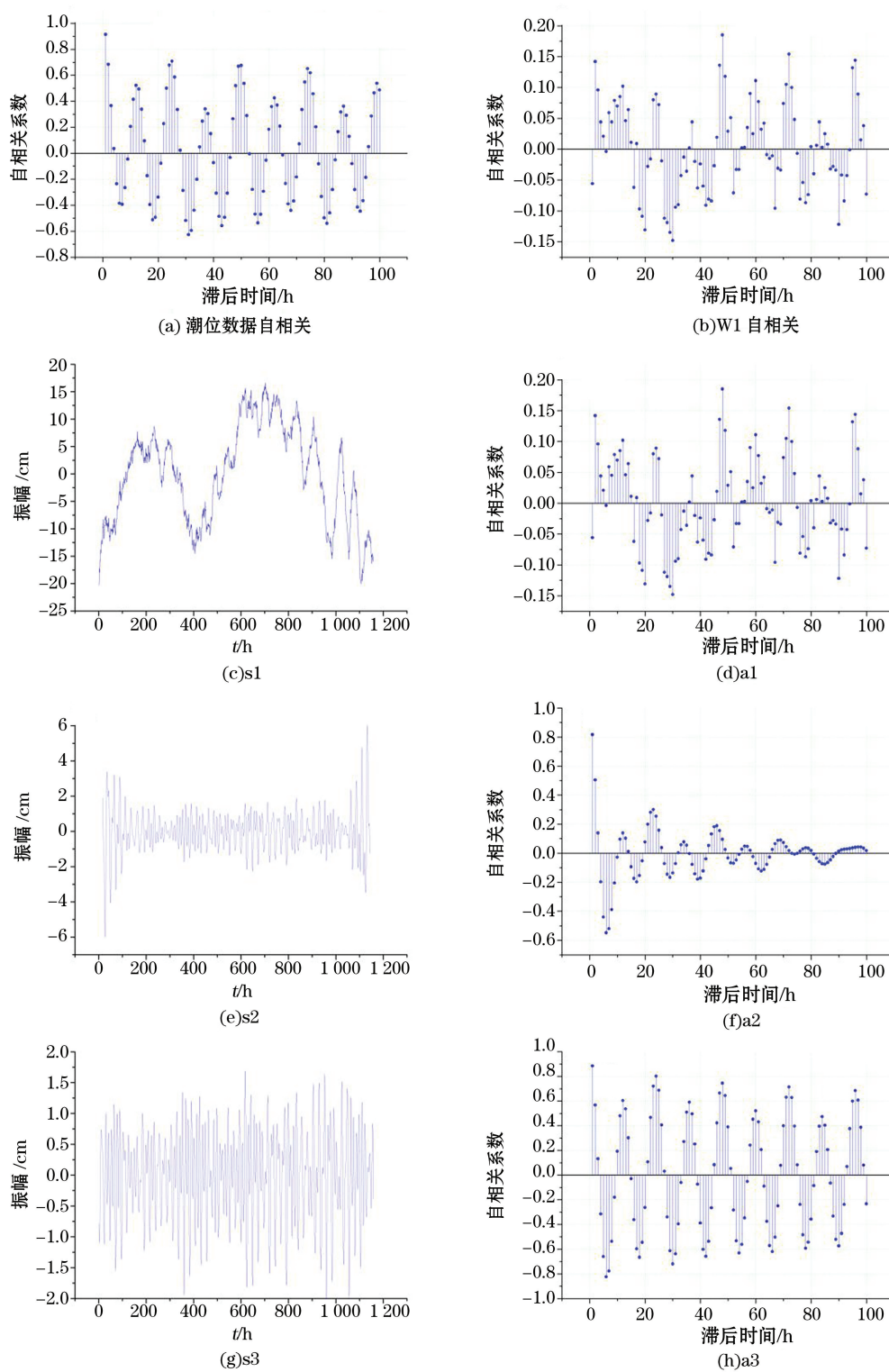


图 4 潮位与不同处理下 W1 井水位自相关曲线图

Fig.4 The changes of water level after different data processing and the corresponding autocorrelation curve

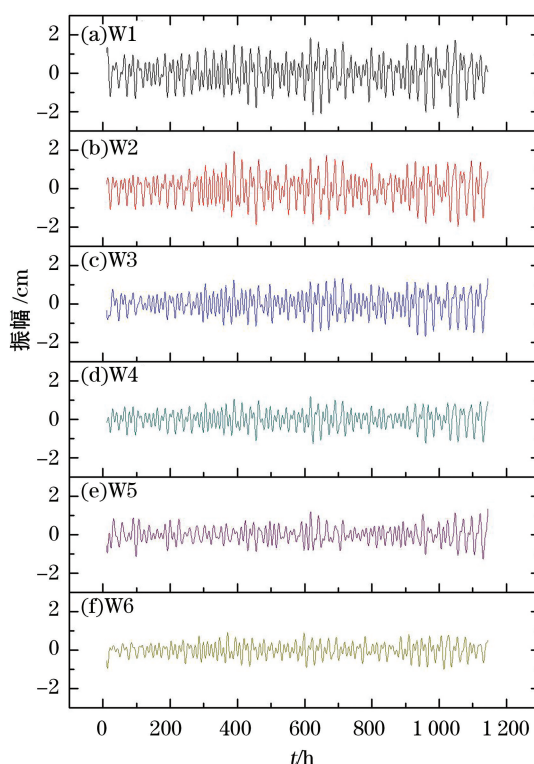


图 5 W1~W6 井水位经去长期趋势并提取 0.035~0.085 之间频率后振幅图

Fig.5 Groundwater level amplitude after removing the trend and filtering

3.4 潮汐对地下水位的影响

在通常状况下采用振幅比较 2 个信号的大小,但这多是针对连续信号而言。在本研究中,一方面由于潮位观测数据和各井地下水位观测数据均为离散数值,另一方面,虽然我们通过去除长期趋势而后滤波的方法,有效提取出了地下水位中受潮汐波动影响的因素,但在原始状态下,地下水位波动并不单纯只受潮位控制,还受到其它多种因素影响,本案例中主要为人为开采地下卤水,虽然从长期来看,地下卤水的开采量是相对稳定的,但在较短时间内出现振幅的异常波动是难以避免的,也是难以预测的。基于这种考虑,单纯的振幅比较只能突出各个监测井地下水位的异常情况,而难以全面反映地下水位整体上的波动特征。

因此,我们采用平均偏差这个指标来度量各个监测井中地下水位的波动大小。平均偏差代表一组测量值中任意数值的偏差,是指单次测定值与平均值的偏差(取绝对值)之和,除以测定次数,从某种意义上来说,我们可以将其看成一个离散信号的平均振幅的概念,它能从整体上反映一个信号的波动情况。

地下水位的波动相对于潮汐存在时间滞后性,并且随其距海岸线距离呈三阶多项式上升,而潮汐波动对地下水位波动的影响必然也与其距海岸线距离有关。从各观测井地下水位平均偏差与其距平均高潮线距离的关系来看(图 6),水位波动的大小基本与其水平距离呈线性关系,随着距平均高潮线水平距离的增加,潮汐对地下水位的影响逐渐降低,曲线斜率为 $-0.000\ 130\ 8$, R^2 值达到 $0.976\ 7$,拟合效果比较理想。

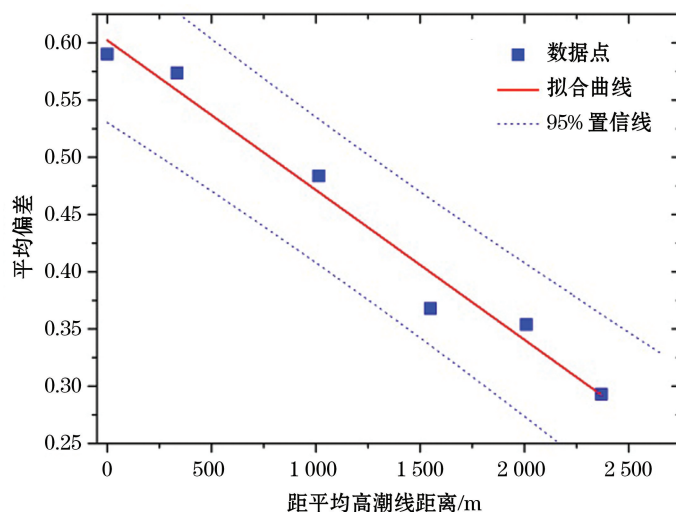


图 6 水位平均偏差与距平均高潮线水平距离的关系

Fig.6 The relationship between the average deviation of the water level and the horizontal distance from the mean high-tide line

4 结 论

时间序列分析地下水位变化是分析潮汐作用对地下水的影响机制的一个重要途径,但是在实际案例中,地下水位的变化往往并不是只受到潮汐这一单一因素的影响,同时还会受到诸如人为抽取地下水、降雨等其他因素的影响,这些因素的存在通常会影响时间序列分析的结果。本文通过交叉谱分析的方法对莱州湾南岸冬季地下水位同潮位的周期关系进行了分析,认为地下水位同潮位共同存在 12 h 和 24 h 两个主要周期,地下水位受潮汐影响的周期性随向陆地方向距离的增加逐渐减弱,并且 24 h 的周期比 12 h 的周期在地下水位中的表现更为强烈。在去除地下水位中的长期趋势后,通过傅里叶变换和逆变换的方法提取出了地下水位中 0.035~0.085 的频率成分,然后利用自相关分析的方法对处理后的地下水位数据与潮位数据进行了对比分析,结果显示在受多种因素影响的莱州湾南岸地区,通过去除长期趋势和提取频率的方法可以有效获取冬季地下水位中受潮汐作用影响的因素,从而为其它研究提供了一种有效的原始数据处理方法。

从各井经去除长期趋势和提取频率后的地下水位振幅变化来看,W1~W6 井振幅逐渐减小,说明本研究剖面上各监测井水位均受到潮汐波动不同程度的影响,水位波动的大小基本与其距平均高潮线的水平距离呈线性关系,随着距离的增加,潮汐对地下水位的影响逐渐降低。

参考文献(References):

- [1] WERNER A D, BAKKER M, POST V E A. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51(1): 3-26
- [2] HERNY H R. Effects of dispersion on saltwater encroachment in coastal aquifers[J]. *US Geological Survey, Water Supply Paper*, 1964: 1613.
- [3] PINDER G F, PAGE R H. Finite element simulation of salt water intrusion on the South Fork of Long Island[J]. *Finite Elements in Water Resources*, 1977: 251-269.
- [4] YAKIREVICH A, MELLOUL A, SOREK S. Simulation of seawater intrusion into the khan yunis area of the gaza strip coastal aquifer [J]. *Hydrogeology Journal*, 1998, 6(4): 549-559.
- [5] SADEG S, KARAHANO DH LU N. Numerical assessment of seawater intrusion in the Tripoli Region, Libya[J]. *Environmental Geolo-*

- gy, 2001, 40(9): 1151-1168.
- [6] BARNETT T P, PIERCE D W, HIDALGO H G. Human-induced changes in the hydrology of the western united states[J]. Science, 2008, 319(5866): 1080-1083.
- [7] ATAIE-ASHTIANI B, VOLKER R E, LOCKINGTON D A. Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1): 17-31.
- [8] GUO H, JIAO J J, LI H. Groundwater response to tidal fluctuation in a two-zone aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(3-4): 364-371.
- [9] ACWORTH R I, HUGHES C E, TURNER I L. A radioisotope tracer investigation to determine the direction of groundwater movement adjacent to a tidal creek during spring and neap tides[J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15(2): 281-296.
- [10] MORROW F J, INGHAM M R, MCCONCHIE J A. Monitoring of tidal influences on the saline interface using resistivity traversing and cross-borehole resistivity tomography[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1): 69-77.
- [11] LI L, BARRY D A, STAGNITTI F. Beach water table fluctuations due to spring-neap tides: moving boundary effects[J]. Advances in Water Resources, 2000, 23(8): 817-824.
- [12] LI H, BOUFADEL M C, WEAVER J W. Tide-induced seawater-groundwater circulation in shallow beach aquifers[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1): 211-224.
- [13] CAREY H, LENKOPANE M K, WERNER A D. Tidal controls on coastal groundwater conditions: field investigation of a macrotidal system[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2009, 56(8): 1165-1179.
- [14] DUFFY C J, GELHAR L W. A frequency domain analysis of groundwater quality fluctuations: interpretation of field data[J]. Water Resources Research, 1986, 22(7): 1115-1128.
- [15] LANYON J A, ELIOT I G, CLARKE D J. Groundwater-level variation during semidiurnal spring tidal cycles on a sandy beach[J]. Marine and Freshwater Research, 1982, 33(3): 377-400.
- [16] KIM J, LEE J, CHEONG T. Use of time series analysis for the identification of tidal effect on groundwater in the coastal area of Kimje, Korea[J]. Journal of Hydrology, 2005, 300(1): 188-198.
- [17] KIM K, SEONG H, KIM T. Tidal effects on variations of fresh-saltwater interface and groundwater flow in a multilayered coastal aquifer on a volcanic island (Jeju Island, Korea)[J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(3): 525-542.
- [18] PARK H, JANG K, JU J W. Hydrogeological characterization of seawater intrusion in tidally-forced coastal fractured bedrock aquifer [J]. Journal of Hydrology, 2012, 446: 77-89.
- [19] ZHOU X, RUAN C X, FANG B, et al. Period and lag of the time series of tide and groundwater levels affected by the tide in coastal aquifers[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(5): 71-74. 周训, 阮传侠, 方斌, 等. 海潮及其影响下海岸带地下水位时间序列的周期性和滞后性[J]. 水文地质工程地质, 2006(5): 71-74.
- [20] RUAN C X, ZHOU X, OU Y C, et al. Groundwater level changes of coastal aquifers caused by tides[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(4): 512-515. 阮传侠, 周训, 欧业成, 等. 海潮引起滨海含水层地下水位变化的初步研究[J]. 地质通报, 2006, 25(4): 512-515.
- [21] F C S, CHEN J Y, ZENG S Q, et al. Statistical analysis on impact of tide on water table fluctuation in coastal aquifer[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(12): 1365-1376. 付丛生, 陈建耀, 曾松青, 等. 滨海地区潮汐对地下水位变化影响的统计学分析[J]. 水利学报, 2008(12): 1365-1376.
- [22] GAO M S, YE S Y, SHI G J, et al. Oceanic tide-induced shallow groundwater regime fluctuations in coastal wetland[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010(04): 24-27. 高茂生, 叶思源, 史贵军, 等. 潮汐作用下的滨海湿地浅层地下水动态变化[J]. 水文地质工程地质, 2010(04): 24-27.
- [23] HAN Y S. Quaternary underground brine in the coastal areas of the Northern China[M]. Beijing: Science Press, 1996. 韩有松. 中国北方沿海第四纪地下水[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [24] ZHANG Z L, NIE X H, LIU E F, et al. The accumulation records of environmental evolution on the salt-water intruded area south of Laizhou Bay since late Pleistocene[J]. Geographical Research, 2005(1): 105-112. 张祖陆, 聂晓红, 刘恩峰, 等. 莱州湾南岸咸水入侵区晚更新世以来的古环境演变[J]. 地理研究, 2005(1): 105-112.
- [25] LEE J, LEE K. Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a Fractured Bedrock Aquifer System[J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(3-4): 190-201.
- [26] TULARAM G A, KEELER H P. The study of coastal groundwater depth and salinity variation using time-series analysis[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2006, 26(7): 633-642.

Study on the Impact of Tides on Groundwater Table Fluctuation in Coastal Aquifer

SU Qiao^{1,2,3}, XU Xing-yong^{1,2,3}, CHEN Guang-quan^{1,2,3}, FU Teng-fei^{1,2,3}, LIU Wen-quan^{1,2},

(1. *Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology*, Qingdao 266061, China;

2. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration*, Qingdao 266061, China;

3. *Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology*, Qingdao 266061, China)

Abstract: Tidal fluctuation has a stable periodicity. When the groundwater is influenced by tide, this periodicity will be reflected on the variations of groundwater level. However, in practical cases, it is very difficult to recognize the weak periodicity of groundwater level caused by tidal influence in the coastal regions since it is usually influenced by groundwater exploitation, rainfall and other factors. In this study, the groundwater level was processed by different methods, and the self-correlation analysis was used for verification. The results showed that after the removal of the long-term trends and the filtering process, the data periodicity characteristics of groundwater levels were mostly consistent with the tidal fluctuation. This demonstrated that the information regarding the tidal influence on the groundwater level could be effectively extracted through this method.

Key words: seawater intrusion; tidal fluctuation; groundwater level; cross spectrum; self-correlation

Received: September 19, 2016